

На правах рукописи



**КИРИЛЛОВ ИЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЬНЫХ  
БАЛОК С ГИБКОЙ СТЕНКОЙ ПРИ РАЗНЫХ  
КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЯХ**

**Специальность: 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Калининград – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»).

Научный руководитель: **Притыкин Алексей Игоревич**,  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), профессор кафедры «Металлические и деревянные конструкции»

**Соловьев Алексей Витальевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»), заведующий кафедрой «Металлические и деревянные конструкции»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ДГТУ»)

Защита состоится 18 мая 2022 г. в 11:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корп. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте [www.cstroy.ru](http://www.cstroy.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Шулятьев Станислав Олегович

## Общая характеристика работы

**Актуальность исследования.** Развитие современной цивилизации, заключающееся также в развитии техники и технологии, находит свое отражение и в строительной отрасли. Переход к новым технологиям, совершенствование конструктивных решений позволяют создавать оригинальные и более экономичные конструкции, обеспечивающие необходимую прочность и надежность. К таким конструкциям, несомненно, относятся балки с гибкой стенкой (БГС). Они обладают низкой металлоемкостью, но за счет более рационального распределение материала по площади поперечного сечения в соответствии с напряженно-деформированным состоянием обладают необходимыми прочностными характеристиками. Рациональность распределения материала заключается в применении тонколистовой стали для стенок таких балок.

В основном БГС представляют собой двутавровые стальные балки с высокой стенкой, подкрепленной поперечными ребрами жесткости (РЖ) или выполненные без подкрепления промежуточными ребрами жесткости с сохранением только спаренных ребер в районе опор. При нагружении таких балок, их полки сопротивляются изгибающему моменту, в то время как стенка – сдвигу. В большинстве практических случаев поперечные силы намного меньше усилий, возникающих в полках, поэтому для получения высокого соотношения прочности и веса выбирают балки с высокой стенкой, уменьшая при этом существенно толщину стенки. При нагружении, из-за высокой гибкости стенки, БГС теряют местную устойчивость еще в упругой стадии нагружения, однако вся балка в целом не теряет своей надежности и может продолжать воспринимать нагрузку. Например, при высоте стенки балки 7 м ее толщина может составлять всего 18 мм.

В настоящее время имеется большой объем как теоретических, так экспериментальных исследований по определению напряженно-деформированного состояния и несущей способности стальных балок с гибкой стенкой. Обработка, дополнение и анализ имеющихся результатов, а также проверка имеющихся данных расчетами методом конечных элементов позволят усовершенствовать процесс проектирования.

Несмотря на то, что вопросами прочности стальных БГС занимаются больше века, некоторые аспекты проектирования, связанные с выбором размеров ребер жесткости и их расположением по длине балки, оценкой величины критической нагрузки при разных видах нагружения, нуждаются в совершенствовании. Подтверждением этому могут служить немногочисленные, но, к сожалению, имеющие место факты разрушения конструкций с БГС. Все сказанное свидетельствует об актуальности подобного рода исследований.

В процессе проектирования стальных БГС одним из важных вопросов является оценка местной устойчивости, совершенствованию расчетных зависимостей которой, посвящена данная работа.

**Степень разработанности темы.** Вопросам исследования устойчивости и несущей способности балок с гибкой стенкой посвящены работы таких отечественных ученых как И.К. Погадаев, Я.И. Ольков, А.С. Полторацнев, Ю.Н. Симаков, В.В. Каленов, М.В. Предтеченский, А.И. Притыкин, Ю.С. Мартынов и др. Среди зарубежных авторов можно отметить работы E. Real, P. Wang, M. Xie, T. Zirakian, F. Presta, S.C. Lee, R. Chacón, M.M. Alinia и др.

Краткий обзор позволяет заключить, что основными направлениями в этих работах являются исследования растянутого поля напряжений, образующегося при потере устойчивости стенки в упругой стадии нагружения, и поиск рациональных размеров поперечных ребер жесткости, подкрепляющих стенку БГС. В существующих требованиях отечественных и зарубежных строительных норм к назначению размеров подкрепляющих ребер имеются определенные расхождения.

**Научно-техническая гипотеза** состоит в предположении, что рациональные размеры подкрепляющего ребра жесткости стальной БГС являются функцией не только высоты стенки балки, но и ее толщины и шага ребер.

**Объектом исследования** являются панели стальных балок с гибкой стенкой и сами стальные балки с гибкой стенкой без подкреплений и подкрепленные поперечными и наклонными ребрами жесткости.

**Предметом исследования** является местная устойчивость стальных БГС при разных видах нагружения и различных видах конструктивного оформления.

**Цель диссертационной работы** – совершенствование расчетных зависимостей для оценки местной устойчивости стальных БГС.

**Задачи работы:**

- выполнить обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований устойчивости и несущей способности стальных балок с гибкой стенкой;
- выполнить анализ требований отечественных и зарубежных стандартов к назначению размеров подкрепляющих РЖ в БГС;
- разработать на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language) программы для расчета на устойчивость стальных пластин и БГС с наклонными и вертикальными РЖ;
- выполнить с помощью разработанных программ конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости пластин, подкрепленных РЖ, при чистом сдвиге и моделей БГС с наклонными и вертикальными РЖ;
- провести экспериментальные исследования устойчивости квадратных и прямоугольных жестко заделанных пластин, подкрепленных РЖ, при чистом сдвиге на моделях из жести;
- провести экспериментальную оценку местной устойчивости стальных БГС, подкрепленных поперечными и наклонными РЖ на моделях из жести при действии сосредоточенной силы;
- разработать и изготовить конструкции портативного стенда для испытаний на местную устойчивость и несущую способность маломасштабных моделей БГС;
- усовершенствовать расчетные зависимости для определения критической нагрузки потери устойчивости стенок от деформаций сдвига и изгиба при действии на БГС сосредоточенной силы или равномерно распределенной нагрузки;
- усовершенствовать расчетные зависимости для назначения минимальных размеров поперечных РЖ стальных БГС;
- на основе данных численного моделирования и экспериментов провести анализ критических нагрузок стальных БГС при различных формах потери местной устойчивости.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- усовершенствованы расчетные зависимости для оценки критических нагрузок местной потери устойчивости стальных БГС с учетом полученных данных экспериментальных исследований и расчетов МКЭ;

- получена зависимость для определения рациональных параметров подкрепляющих ребер жесткости, основанная на соотношении изгибной жесткости ребра и цилиндрической жесткости стенки балки;

- для двух вариантов нагружения стальных БГС (сосредоточенной силой и равномерно распределенной нагрузкой) предложены критерии определения форм потери устойчивости (от деформации сдвига или изгиба).

**Теоретическая значимость** работы состоит в том, что:

- установлены закономерности потери местной устойчивости стальными БГС в зависимости от конструктивного оформления и вида нагрузки;

- дана теоретическая и экспериментальная оценка точности современных нормативных методик расчета устойчивости стальных БГС и нормативных рекомендаций по их подкреплению ребрами жесткости;

- установлено, что при постоянной поперечной силе критическая нагрузка при сдвиге не зависит от длины балки;

- введено понятие критерия смены форм потери устойчивости  $k_\phi$  и предложен алгоритм для его определения.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что:

- предлагаемые методики и зависимости в области расчета устойчивости стальных БГС и подкрепления их РЖ позволяют повысить эффективность проектирования за счет применения решения с наиболее рациональным конструктивным оформлением, а также повысить точность проводимых при проектировании расчетов;

- установлено, что при постоянной поперечной силе критическая нагрузка, при которой происходит локальная потеря устойчивости стенки БГС, не зависит от длины шарнирно опертой балки;

- показано на основе экспериментов и расчетов МКЭ, что установка наклонных РЖ наряду с поперечными может в 1,7 раза повысить критическую нагрузку БГС;

- разработаны на языке APDL программы для расчета критических нагрузок БГС и пластин при сдвиге;

- разработаны и изготовлены запатентованные портативные стенды для испытаний на устойчивость и несущую способность маломасштабных моделей балок.

**Методология и методы исследования.** Основой исследований являлись работы отечественных и зарубежных ученых в области прочности и устойчивости балок с гибкой стенкой с использованием механики тонкостенных конструкций, методов математического и физического моделирования конструкций, методов конечно-элементного анализа и строительной механики, а также табличного процессора Excel. Применялись экспериментальные методы и теория моделирования при исследовании НДС и местной устойчивости стальных БГС.

**Личный вклад автора:**

- выполнен обзор отечественных и зарубежных исследований устойчивости и несущей способности стальных балок с гибкой стенкой;
- проведен анализ требований отечественных и зарубежных стандартов к назначению размеров подкрепляющих РЖ стальных БГС;
- разработаны на языке APDL программы для расчета на устойчивость пластин и балок с гибкой стенкой с наклонными и вертикальными РЖ;
- выполнен с помощью разработанных программ конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости пластин, подкрепленных РЖ, при чистом сдвиге и моделей БГС с наклонными и вертикальными РЖ;
- проведены экспериментальные исследования устойчивости квадратных и прямоугольных жестко заделанных пластин, подкрепленных РЖ, при чистом сдвиге на моделях из жести;
- проведены экспериментальные исследования местной устойчивости БГС, подкрепленных поперечными и наклонными РЖ на моделях из жести при действии сосредоточенной силы;
- разработаны и изготовлены портативные стенды для испытаний на местную устойчивость и несущую способность маломасштабных моделей БГС;
- усовершенствованы расчетные зависимости для оценки критических нагрузок при потере устойчивости стенок от деформаций сдвига и изгиба при нагружении стальных БГС сосредоточенной силой;
- усовершенствованы расчетные зависимости для назначения минимальных размеров поперечных РЖ стальных БГС;

– на основе данных численного моделирования и экспериментов проведен анализ критических нагрузок БГС при различных формах потери местной устойчивости.

**Положения, выносимые на защиту:**

- расчетные зависимости для оценки критических нагрузок местной потери устойчивости стальных БГС;
- расчетные зависимости для определения рациональных параметров подкрепляющих ребер жесткости;
- критерии определения формы потери устойчивости стальных БГС;
- рекомендации по подкреплению стальных БГС наклонными РЖ.

**Степень достоверности результатов** теоретических положений, математических и физических моделей, обоснованность выводов обеспечивается: корректностью поставленных задач и использованием общепринятых в строительной механике гипотез и допущений. Численные результаты расчетов по предлагаемым зависимостям подтверждаются удовлетворительным их согласованием с данными об устойчивости конструкций, полученными в ходе экспериментов как самим автором, так и другими исследователями.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на: международной конференции «Mechanika-2014», (г. Каунас, Литва, 2014) [80]; XII международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2014» (г. Калининград, 2014) [16]; VI Международном балтийском морском форуме (Калининград, 2018) [9]; международной конференции «Construction and Architecture: Theory and Practice of Industry Development (CATPID 2018)» [79].

**Внедрение результатов работы.** Результаты исследований внедрены:

- в рабочий процесс проектирования балок с гибкой стенкой в несущих конструкциях покрытий общественных и промышленных зданий в ООО «АСК «Вавилон» (г. Калининград) и в ООО «Гравионт-Проект» (г. Калининград).
- в учебный процесс Балтийского федерального университета им. И. Канта при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – Строительство.

**Публикации.** Материалы исследований опубликованы в 13 печатных работах, включая статью в журнале «Mechanika», цитируемом в Web of Science; 2 статьи в материалах научного форума «Materials Science Forum», цитируемого в

базе данных Scopus; 2 статьи в изданиях по списку ВАК РФ (1,2 печатных листа, из них 0,35 печатных листа выполнены автором); 3 патента на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объем публикаций составляет 3,55 печатных листа, из них лично автором 1,45 печатных листа.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка литературы (101 наименование), приложений и содержит 160 страниц машинописного текста, включая 8 таблиц и 64 рисунка.

### Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана оценка состояния проблемы, определены цели и задачи исследования, указаны научная новизна и практическое значение диссертации.

**В первой главе** выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований различных типов стальных БГС с анализом методов их расчета. Обзор конструктивных решений БГС указывает на большое разнообразие форм подкреплений и расположения РЖ, применяемых в строительстве. Выбрать среди них наиболее оптимальные варианты возможно лишь после анализа влияния разных элементов конструктивного оформления на устойчивость БГС.

На основании выполненного обзора делается вывод о необходимости дальнейшего совершенствования расчетных зависимостей для оценки местной устойчивости стальных балок с гибкой стенкой и требований СП 294.1325800.2017 к назначению размеров подкрепляющих РЖ.

**Вторая глава** посвящена анализу устойчивости стальных БГС без подкреплений при деформациях сдвига и изгиба.

Потеря устойчивости стенки БГС может происходить либо от нормальных напряжений  $\sigma_{cr}$ , обусловленных величиной изгибающего момента, либо от касательных напряжений  $\tau_{cr}$ , вызванных поперечной силой  $V_{cr}$ .

В настоящее время общепринято, что предельное значение поперечной силы БГС  $V_u$  может быть вычислено как сумма двух компонент

$$V_u = V_{cr} + V_{pb}, \quad (1)$$

где  $V_{cr}$  – критическое значение поперечной силы, соответствующее потере устойчивости стенки от сдвига в упругой стадии нагружения;  $V_{pb}$  – резерв прочности в закритической стадии.

Величина  $V_{pb}$  по теории Баслера-Тюрлимана определяется как

$$V_{pb} = 0,5R_y(1 - \tau_{cr} / R_s)at_w \sin \alpha \cdot tg \alpha. \quad (2)$$

В работе основное внимание уделено определению компоненты  $V_{cr}$  в выражении (1) для двух вариантов нагружения шарнирно опертой балки (сосредоточенной силой  $F$  и равномерно распределенной нагрузкой  $q$ ) и двух форм местной потери устойчивости стенки (от деформаций сдвига и изгиба).

В соответствии с СП 294.1325800.2017 критическое значение поперечной силы  $V_{cr}$ , вызывающей потерю устойчивости при сдвиге, можно вычислять как

$$V_{cr} = \tau_{cr} t_w h_w. \quad (3)$$

При этом величина критических напряжений  $\tau_{cr}$  шарнирно опертой балки согласно СП 16.13330.2017 определяется по соотношению

$$\tau_{cr} = 10,3(1 + 0,76 / \mu^2)R_s / \bar{\lambda}_d^2. \quad (4)$$

После подстановок в (4)  $R_s = 0,58R_y$  и  $\bar{\lambda}_d^2 = (d / t_w)^2 R_y / E$  с учетом того, что  $d = h_w$ , можно для балки с гибкой стенкой получить

$$\tau_{cr} = 5,97(1 + 0,76 / \mu^2)E(t_w / h_w)^2, \quad (5)$$

где  $\mu = a / h_w$  – отношение большей стороны отсека к меньшей;  $a$  – расстояние между поперечными РЖ.

Подстановка (5) в (3) позволяет вычислить  $V_{cr}$  БГС без промежуточных РЖ при потере устойчивости от сдвига в виде

$$V_{cr,сдвиг} = 5,97(1 + 0,76 / \mu^2)Et_w^3 / h_w. \quad (6)$$

В случае равномерно распределенной нагрузки  $q$  величина поперечной силы в опорном сечении, где происходит потеря устойчивости стенки балки от сдвига, вычисляется как  $V_{cr} = q_{cr}l / 2$  и тогда из (6) можно получить величину  $q_{cr}$  в виде

$$q_{cr,сдвиг} = 11,9(1 + 0,76 / \mu^2)Et_w^3 / h_w l. \quad (7)$$

Для обозначения размеров БГС будем использовать форму записи  $l - H - t_w - b_f - t_f$ , где  $l$  и  $H$  – длина и высота балки,  $t_w$  – толщина стенки,  $b_f$  и  $t_f$  – ширина и толщина полок. Сопоставительный анализ результатов МКЭ и вычислений критической нагрузки  $q_{cr,сдвиг}$  по зависимости (7) показал наличие значительных расхождений, достигающих 12%. Причем расчеты свидетельствуют о том, что критическая нагрузка не зависит от величины  $\mu$  ( $\mu = a / h_w$  – отношение большей стороны отсека к меньшей).

Гораздо лучшую корреляцию с расчетами МКЭ можно получить, внося коррективы в зависимость (7), убрав скобку и несколько увеличив числовой коэффициент, что позволяет получить обозначенную зависимость в форме

$$q_{cr,сдвиг} = 12,9Et_w^3 / h_w l, \quad (8)$$

Построенные по данным расчетов МКЭ и по зависимости (8) графики  $q_{cr}$  в функции от относительной длины балки  $l / h_w$  (рисунок 1) свидетельствуют об удовлетворительной их корреляции. Максимальное расхождение в величинах  $q_{cr}$  в диапазоне  $5 \leq l / h_w \leq 10$  не превышает 1,5%.

В случае местной потери устойчивости БГС от изгиба под действием равномерно распределенной нагрузки  $q$  выпучивание стенки происходит уже не в районе опорных сечений, а в средней части балки, где действует максимальный изгибающий момент.

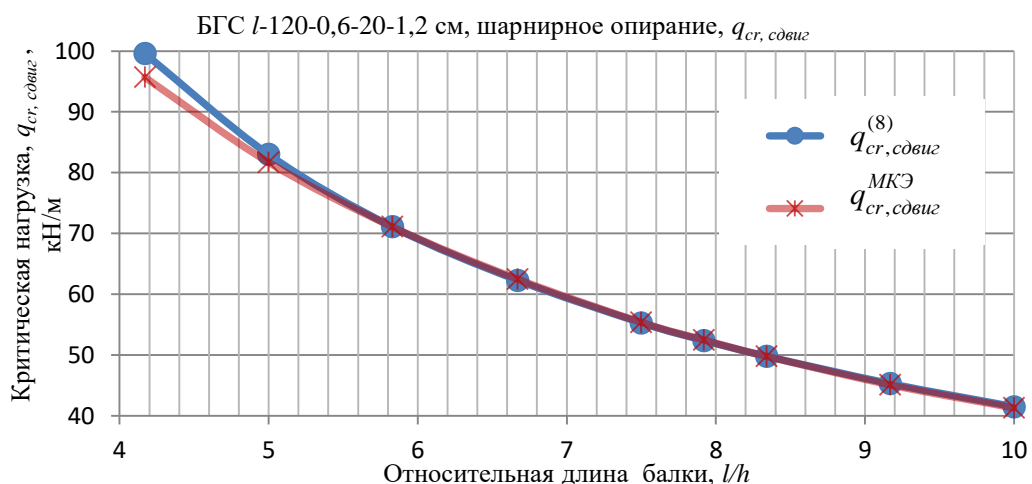


Рисунок 1 – Зависимость  $q_{cr,сдвиг}^{МКЭ}$  и  $q_{cr,сдвиг}^{(7)}$  шарнирно опертой БГС от ее относительной длины

Для определения критической нагрузки в этом варианте надо учесть, что в СП 16.13330.2017 нормальные напряжения  $\sigma_{cr}$  рекомендуется вычислять как

$$\sigma_{cr} = c_{cr}(\delta)R_y / \bar{\lambda}_w^2. \quad (9)$$

Коэффициент  $c_{cr}(\delta)$  согласно СП 16.13330.2017 изменяется в относительно узком диапазоне  $30 \leq c_{cr}(\delta) \leq 35,5$  и, как показывают расчеты МКЭ, может быть принят равным  $c_{cr}(\delta) = 34,9$ . Тогда выражение (9) примет вид

$$\sigma_{cr, изгиб} = 34,9E(t_w / h_w)^2. \quad (10)$$

Максимальные напряжения  $\sigma_{max}$  в БГС с шарнирным опиранием под действием нагрузки  $q$  можно вычислить как

$$\sigma_{max} = 0,125ql^2 / (b_f t_f H + H^2 t_w / 6). \quad (11)$$

Приравняв выражения (10) и (11) и полагая, что для балок большой высоты, каковыми являются БГС,  $h_w \approx H$ , получим выражение для критической нагрузки при потере устойчивости от изгиба в форме

$$q_{cr, изгиб} = 279Et_w^3(b_f t_f / (H t_w) + 0,167) / l^2. \quad (12)$$

Расчеты МКЭ устойчивости шарнирно опертой БГС  $l-120-0,6-20-1,2$  см под распределенной нагрузкой  $q$  при  $l / h_w \geq 12$  показаны на рисунке 2.

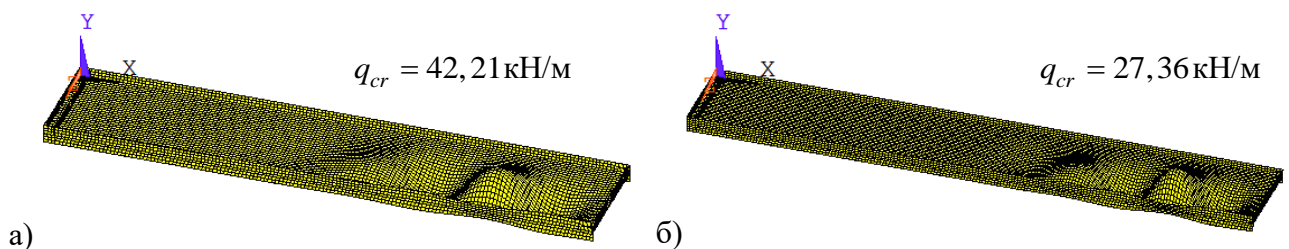


Рисунок 2 – Критические нагрузки  $q_{cr, изгиб}^{МКЭ}$  шарнирно опертой БГС  $l-120-0,6-20-1,2$  см при потере устойчивости стенки от изгиба: а)  $l = 12$  м; б)  $l = 15$  м

Проверка полученной зависимости (12) сопоставлением с расчетами МКЭ (рисунок 3) подтверждает удовлетворительную корреляцию результатов: расхождение не превышает 4,3%. При этом с увеличением относительной длины балки сходимость решения (12) улучшается.

Приведенные зависимости (8) и (12) удобны для практического применения, так как позволяют по параметрам балки сразу определять величину критической нагрузки  $q_{cr}$ . Вполне понятно, что применимость их ограничена условием потери

устойчивости в пределах упругих деформаций, т. е. величины (5) и (10) не должны превышать расчетных значений текучести материала  $R_s$  и  $R_y$  соответственно.

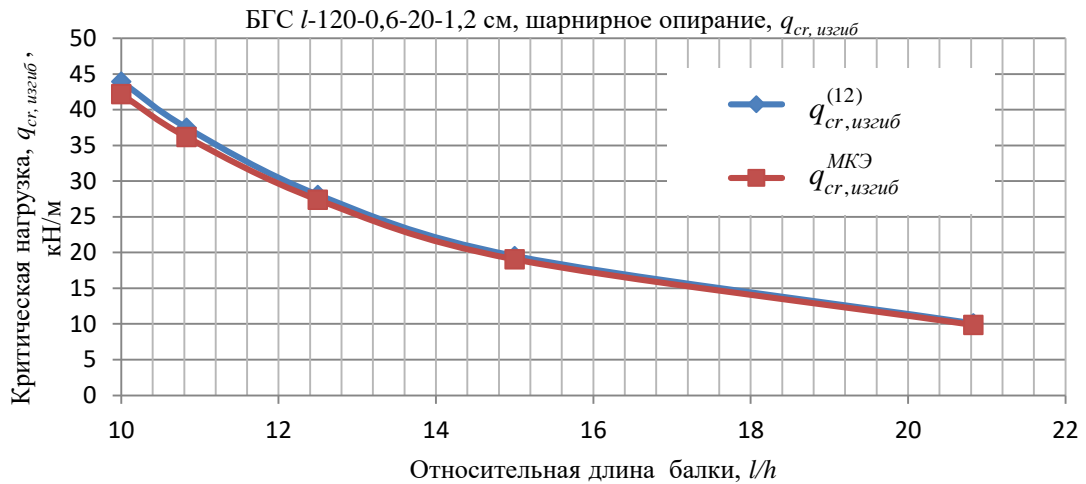


Рисунок 3 – Зависимость  $q_{cr, изгиб}^{МКЭ}$  и  $q_{cr, изгиб}^{(12)}$  шарнирно опертой БГС от ее относительной длины при равномерно распределенной нагрузке

Для варианта потери устойчивости стенки БГС от изгиба при действии сосредоточенной силы посередине пролета критическое её значение  $F_{cr}$  можно получить из (12), если учесть соотношение между изгибающими моментами в двух указанных вариантах нагружения  $0,25Fl = 0,125ql^2$ . Тогда из (12) получим

$$F_{cr, изгиб} = 139,5Et_w^3(b_f t_f / (Ht_w) + 0,167) / l. \quad (13)$$

Проверка выражения (13) для шарнирно опертых БГС  $l-120-0,6-20-1,2$  см под действием сосредоточенной силы при разных длинах, произведенная расчетами МКЭ с помощью программного комплекса ANSYS (рисунок 4), подтверждает удовлетворительную точность получаемых результатов.

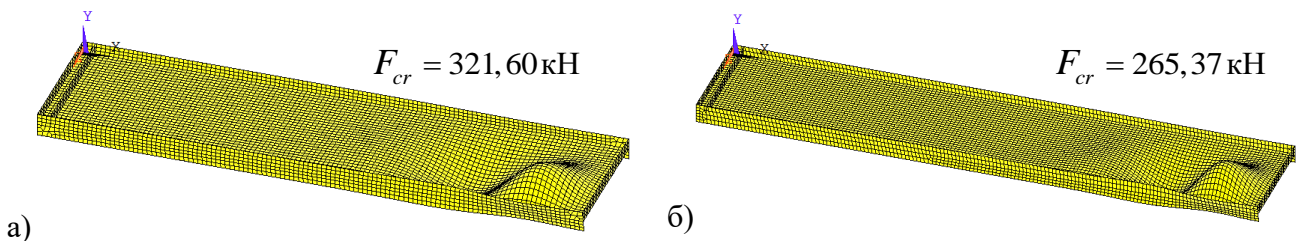


Рисунок 4 – Потеря устойчивости шарнирно опертой БГС  $l-120-0,6-20-1,2$  см от изгиба при сосредоточенной силе посередине пролета: а)  $l = 9,5$  м; б)  $l = 12$  м

Для варианта нагружения БГС  $l-50-0,3-19-1,78$  см сосредоточенной силой  $F$  посередине пролета при наличии только одинарных РЖ в районе опор и одного ребра под силой расчеты МКЭ приводят к значениям  $F_{cr, сдвиг}$  (рисунок 5),

показывающим, что длина балки не оказывает никакого влияния на величину критической нагрузки, а потеря устойчивости происходит от сдвига. При рассмотрении этого варианта при действии сосредоточенной силы посередине пролета выражение для критической нагрузки  $F_{cr,сдвиг}$  можно получить из (8), если учесть соотношение между поперечными силами  $V$  для варианта нагружения распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой  $F/2 = ql/2$ . Тогда получим

$$F_{cr,сдвиг} = 12,9Et_w^3 / h_w. \quad (14)$$

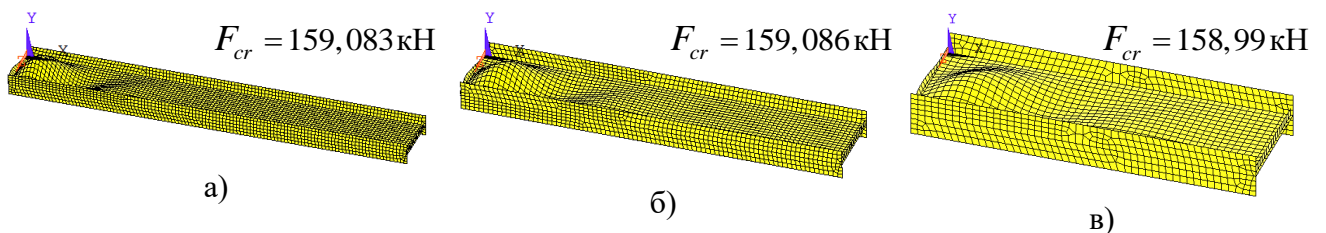


Рисунок 5 – Критические нагрузки (кН) стенки шарнирно опертой БГС  $l-50-0,3-19-1,78$  см при нагружении силой  $F$  посередине пролета: а)  $l/H = 14$ ; б)  $l/H = 10$ ; в)  $l/H = 6$

При наличии спаренных ребер в опорном сечении картина потери устойчивости стенки несколько меняется, поскольку наличие двух близко расположенных ребер создает жесткую заделку стенке. Зона выпучивания при постоянстве поперечной силы по всей длине балки смещается от опорного сечения к центру балки, как это можно видеть на рисунке 6. В этом случае величина  $F_{cr}$  не остается постоянной, а уменьшается с увеличением длины балки, так как в сечении появляется изгибающий момент, который в определенной степени догружает сечение и приводит к снижению критической нагрузки. Действительно, при относительной длине БГС  $l/H = 10$  потеря устойчивости происходит при  $P_{cr} = 176,3$  кН, а при  $l/H = 14$  критическая нагрузка снижается до  $P_{cr} = 166,5$  кН.

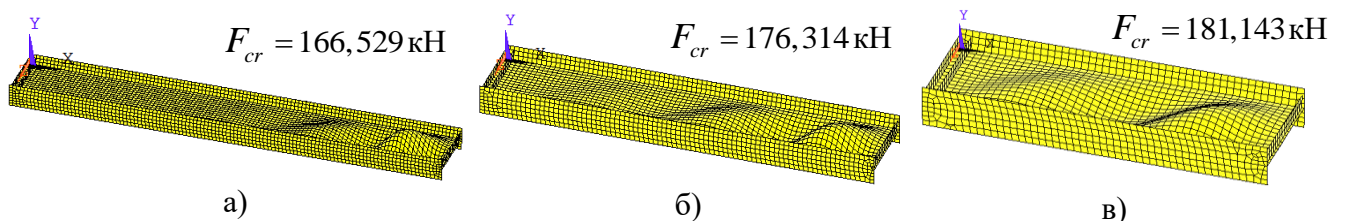


Рисунок 6 – Критические нагрузки (кН) стенки шарнирно опертой БГС  $l-50-0,3-19-1,78$  см без подкреплений при нагружении сосредоточенной силой посередине пролета:

а)  $l/H = 14$ ; б)  $l/H = 10$ ; в)  $l/H = 6$

Полученные выше результаты относились к балкам без подкреплений, но в СП 16.13330.2017 указывается, что при условной гибкости стенки

$\bar{\lambda}_w = (h_w / t_w) \sqrt{R_y / E} \geq 3,2$  необходимо подкреплять БГС поперечными РЖ.

Расположение РЖ определяется формой потери устойчивости балки.

Чтобы заранее знать, по какой из форм будет происходить местная потеря устойчивости неподкрепленной стальной БГС, можно ввести критерий формы  $k_\phi$ , представляющий собой для случая распределенной нагрузки отношение (12) к (8).

$$k_\phi = 21,6(\beta + 0,167) / \xi, \quad (15)$$

где  $\beta = A_f / A_w$  – отношение площади полки к площади стенки;  $\xi = l / h_w$ .

Если критерий  $k_\phi > 1$ , то потеря устойчивости при распределенной нагрузке происходит от сдвига, а если  $k_\phi < 1$ , то от изгиба.

**Третья глава** посвящена вопросам назначения оптимальных размеров РЖ при оценке устойчивости стальных БГС и прямоугольных пластин, рассматриваемых как отсеки БГС. В СП 16.13330.2017 рекомендуется стенку балки подкреплять поперечными РЖ с шагом не более  $2h_w$ , а ширину ребра принимать не менее

$$b_s \geq h_w / 24 + 40 \text{ мм}. \quad (16)$$

Толщина ребер согласно СП должна удовлетворять неравенству

$$t_s \geq 2b_s \sqrt{R_y / E}. \quad (17)$$

Отметим, что особенностью соотношения (16) является отсутствие связи с толщиной стенки БГС  $t_w$  и с шагом ребер жесткости  $a$ .

Опираясь на проведенные нами с помощью расчетов МКЭ исследования, а также на результаты работ С.П. Тимошенко, оптимальные размеры РЖ можно определить из соотношения жесткостей ребра и отсека стенки БГС

$$EI_s / Dl_s \geq 6h_w^2 / a^2, \quad (18)$$

где  $I_s = t_s b_s^3 / 3$  – момент инерции ребра жесткости относительно его основания;  $D = Et_w^3 / 12(1 - \nu^2)$  – цилиндрическая жесткость стенки БГС;  $l_s = h_w / \sin \vartheta$  – протяженность наклонного ребра. После подстановки выражений для  $I_s$  и  $D$  в (18) получим с учетом  $\nu = 0,3$  для поперечного ребра

$$b_s \geq h_w \sqrt[3]{1,65 t_w^3 / a^2 t_s}. \quad (19)$$

При вычислении  $b_s$  в зависимости (19) чаще всего принимают  $t_s = t_w$ .

При заданной гибкости стенки БГС  $\lambda_w = 250$  построенные графики изменения ширины подкрепляющего РЖ от высоты БГС (рисунок 7) показали, что вычисления по (16) приводят к несколько большим значениям  $b_s$ , чем по (19).

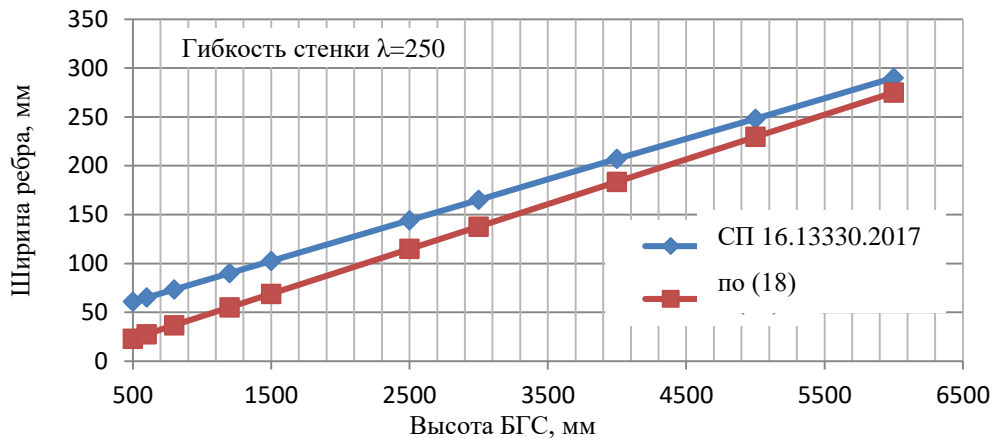


Рисунок 7 – Зависимость ширины РЖ от высоты стенки БГС по СП 16.13330.2017 и по (19)

Следствием несколько избыточных значений  $b_s$  является и завышенное требование (16) к толщинам ребер. Построенные для варианта  $R_y = 345$  МПа и  $E = 210$  ГПа графики требуемых по СП толщин ребер (рисунок 8) указывают, что получаемые по (16) результаты почти всегда превосходят толщины стенки БГС. Исключение составляют лишь балки высотой свыше 5 м. Приемлемость зависимости (19) подтверждена расчетами МКЭ.

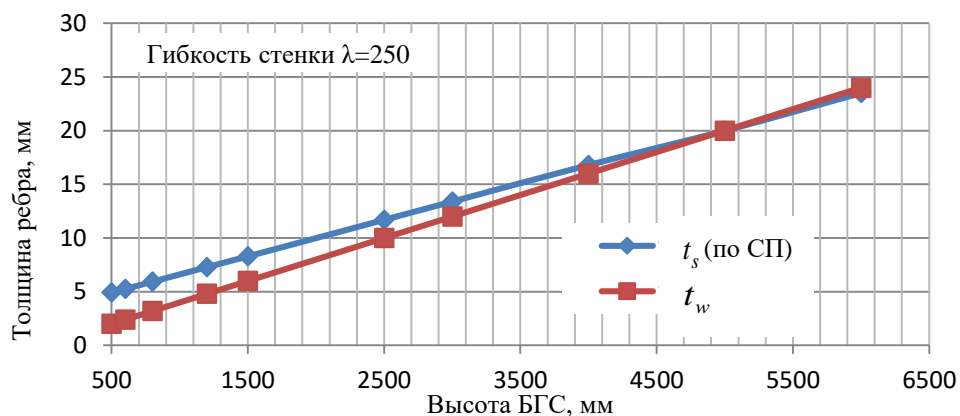


Рисунок 8 – График изменения толщин РЖ и стенки от высоты стенки БГС

Несмотря на то, что расчеты МКЭ дают достоверную информацию об устойчивости пластин, в работе были проведены также экспериментальные исследования устойчивости прямоугольных пластин с наклонными РЖ при сдвиге.

В эксперименте проверяются те факторы, которые не учтены в расчете: например, разброс толщин пластины по площади, наличие ее начальной погиби и т. п.

Эксперимент по исследованию устойчивости квадратных и прямоугольных пластин при сдвиге, подкреплённых наклонными ребрами жесткости, проводился на установке (рисунок 9,а), представляющей собой вертикальную стойку 1, укрепленную на фундаменте. На верхнем конце стойки размещено разноплечее коромысло 2, к одному из концов которого крепился талреп 3, служащий для нагружения пластины, ко второму – испытуемый образец в шарнирном квадратном или прямоугольном четырехзвеннике 4, присоединенный к динамометру 5 для фиксации прикладываемого усилия. Вращением талрепа обеспечивалось нагружение обоймы усилием растяжения. Осевое нагружение четырехзвенника вдоль одной из диагоналей, приводило практически к чистому сдвигу пластины.

При наличии 2-х РЖ, установленных под углом  $45^\circ$  (рисунок 9,б), нагрузка в эксперименте возросла по сравнению с нагрузкой неподкреплённой пластины всего на 4%, при этом в балке эффект оказался намного весомее.

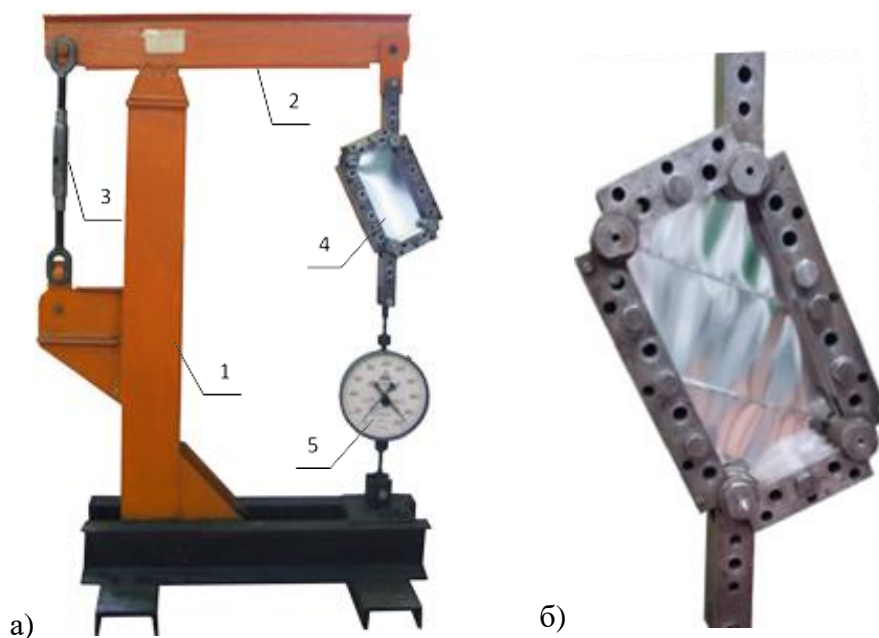


Рисунок 9 – Установка и образец пластины, испытанный на устойчивость при сдвиге  
 а) установка: 1 – станина, 2 – разноплечий рычаг, 3 – талреп, 4 – испытуемый образец, 5 – динамометр; б) пластина с диагональными РЖ в обойме

В четвертой главе исследовались вопросы устойчивости БГС, подкреплённых поперечными и наклонными РЖ, при поперечном изгибе. Анализ

устойчивости МКЭ сопровождался экспериментами на маломасштабных моделях балок из жести, подверженных действию сосредоточенных сил.

Расчет модели МК-4-1 с поперечными РЖ размером  $b_r \times t_r = 1,9 \times 0,19$  мм показал, что величина критической нагрузки составляет  $F_{cr, сдвиг}^{МКЭ} = 321,9$  Н (рисунок 10,а) и хорошо согласуется с значением, полученным по (14).

Для модели МК-4-3 (рисунок 10,б), имеющей семь РЖ (по 2 спаренных ребра на опорах и 3 в пролете на одинаковых расстояниях друг от друга) при  $a / h_w = 1$ , данные МКЭ указывают на повышение устойчивости до уровня  $F_{cr, сдвиг}^{МКЭ} = 356,1$  Н.

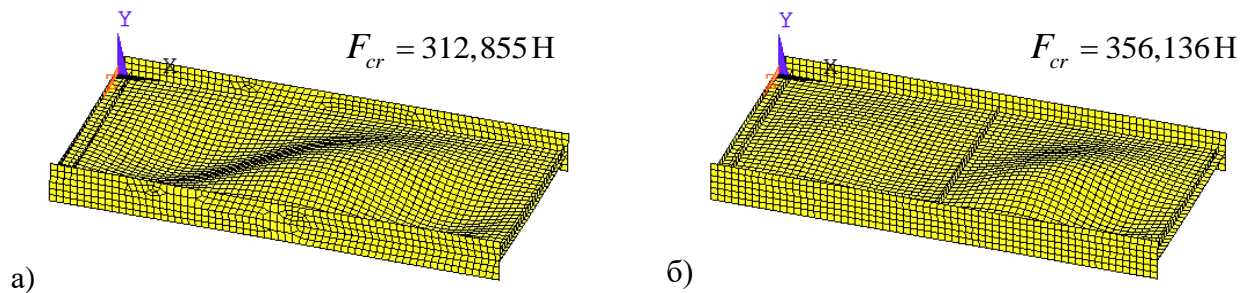


Рисунок 10 – Критические нагрузки  $F$  (Н) балки 260-60-0,19-12-0,6 мм под сосредоточенной силой: а) без подкреплений; б) с промежуточными РЖ

Учесть наличие РЖ можно, воспользовавшись соотношением

$$F_{cr, сдвиг}^{теор} = 12,9(0,447\mu^2 - 1,45\mu + 2,11)Et_w^3 / h_w, \text{ при } 0,5 \leq \mu \leq 2. \quad (20)$$

При  $\mu = a / h_w = 2$  зависимость (20) переходит в зависимость (14).

Для варианта модели МК-4-3 (рисунок 10,б) с  $\mu = 1$  из (19) получим  $F_{cr, сдвиг}^{теор} = 349,8$  Н, что дает расхождение с данными МКЭ  $F_{cr, сдвиг}^{МКЭ} = 356,1$  Н в 1,8%.

Критическая нагрузка модели балки МК-4-5 с пятью промежуточными РЖ (рисунок 11,а) по данным МКЭ получилась равной  $F_{cr, сдвиг}^{МКЭ} = 427,4$  Н, т. е. практически совпадало с расчетом по (20)  $F_{cr, сдвиг}^{теор} = 424$  Н при  $\mu = 0,667$ .

Дальнейшее увеличение числа РЖ (модель балки МК-4-7) приводит к значению  $F_{cr, сдвиг}^{МКЭ} = 480$  Н (рисунок 11,б), дающему расхождение с  $F_{cr, сдвиг}^{теор} = 473$  Н при  $\mu = 0,3$  в 1,5%.

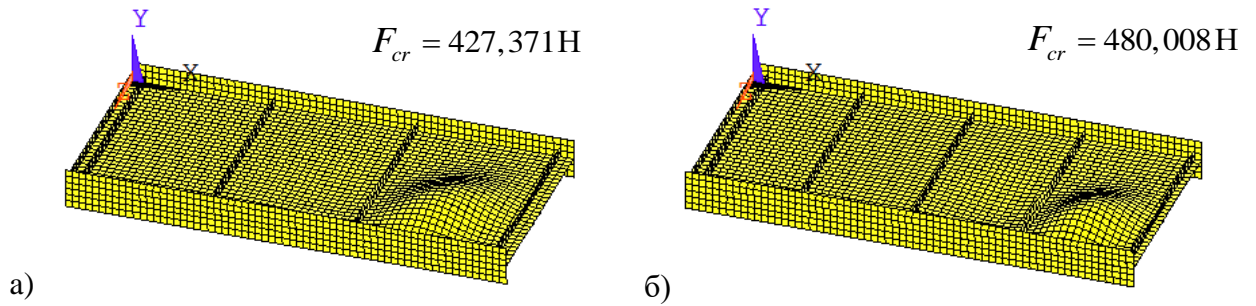


Рисунок 11 – Критические нагрузки  $F$  (Н) балки 260-60-0,19-12-0,6 мм под сосредоточенной силой: а) при 5-ти РЖ; б) при 7-ми РЖ

При оценке устойчивости моделей БГС 260-60-0,19-12-0,6 мм (рисунок 12) выяснялось влияние на устойчивость наклонных ребер. Расчет МКЭ модели без наклонных РЖ (рисунок 12,а) показал, что величина  $F_{cr} = 370,1$  Н, а устойчивость теряют отсеки в центральной части балки. Установка наклонных ребер только в центральных (рисунок 12,б) или только в концевых отсеках (рисунок 12,в) незначительно повышает устойчивость БГС до  $F_{cr} = 379,3$  Н. Лишь наличие наклонных ребер во всех отсеках (рисунок 12,г) ведет к росту  $F_{cr}$  в 1,8 раза.

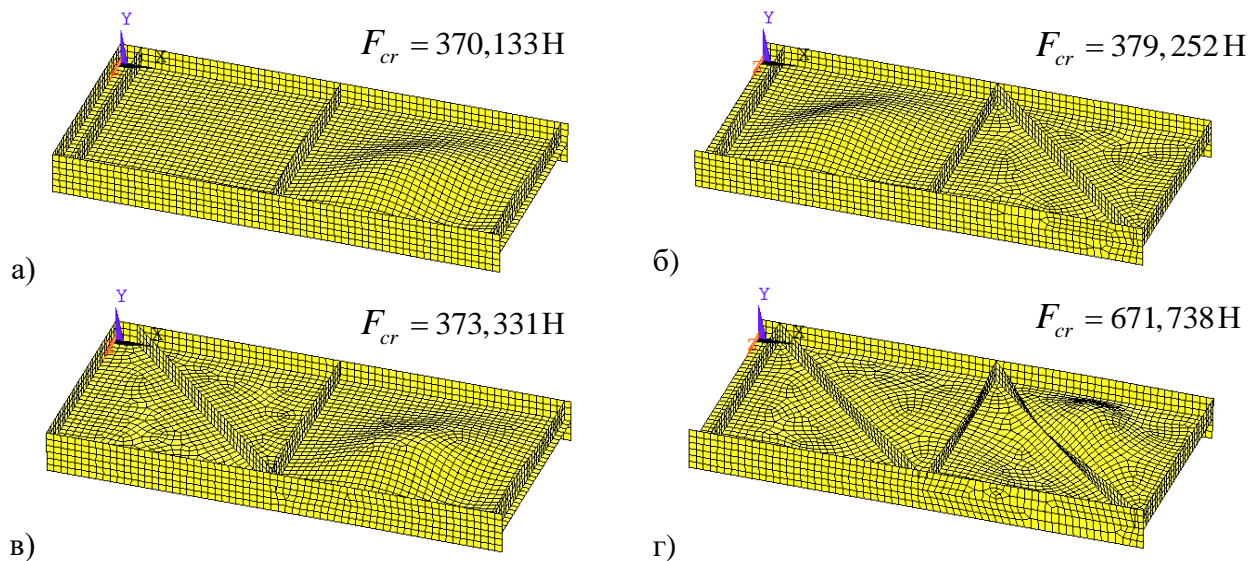


Рисунок 12 – Потеря устойчивости шарнирно опертой балки 260-60-0,19-12-0,6 мм под сосредоточенной силой (половина длины)

Модели БГС на устойчивость испытывались на разработанном автором вместе с А.И. Притыкиным стенде, а затем на несущую способность испытывались уже в машине Р-0,5. Деформации измерялись индикаторами ИЧ-0,01, а величина нагрузки фиксировалась цифровым динамометром ДР-600. Испытание моделей БГС на устойчивость на машине Р-0,5 проводилось до потери балкой несущей

способности, чтобы оценить резерв прочности. Модели из жести имели различные варианты подкрепления стенки: без промежуточных РЖ, с поперечными РЖ (рисунок 13,а), с поперечными и наклонными РЖ (рисунок 13,б).

В процессе испытаний фиксировались две нагрузки:  $F_{cr}$  – критическая нагрузка выпучивания стенки;  $F_u$  – предельная нагрузка, выдерживаемая балкой.

Расчет несущей способности модели 260-60-0,19-12-0,6 мм с 3-мя промежуточными РЖ по зависимости (1) с учетом (2) приводит к значению

$$V_u = V_{cr} + V_{pb} = 178 + 0,5 \cdot 200(1 - 15,7 / 116) \cdot 60 \cdot 0,19 \cdot 0,707 \cdot 1 = 875 \text{ Н}, \quad (21)$$

где  $a = 60$  мм – расстояние между поперечными ребрами;  $\alpha = 45^\circ$  – угол наклона диагонали;  $R_y = 200$  МПа и  $R_x = 0,58R_y$  расчетные сопротивления текучести жести на растяжение и сдвиг. Величина  $V_{cr} = F_{cr} / 2$  определялась по (20), а  $\tau_{cr} = V_{cr} / h_w t_w$ .

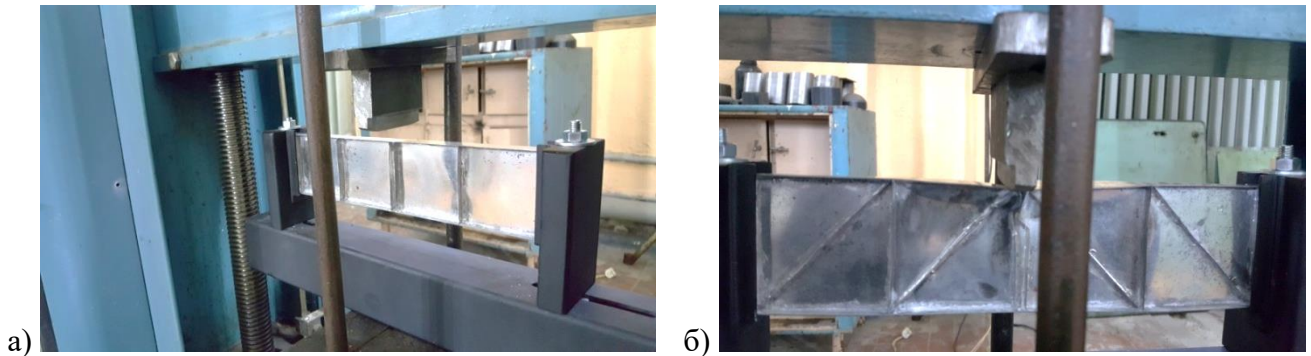


Рисунок 13 – Испытание при нагружении сосредоточенной силой моделей из жести: а) с поперечными ребрами; б) с поперечными и наклонными ребрами жесткости

При нагружении модели 260-60-0,19-12-0,6 мм величина  $F_{cr, сдвиг}^{эксн} = 370$  Н, при этом потеря устойчивости происходила в отсеке рядом с силой  $F$ . Дальнейшее нагружение после выпучивания стенки зафиксировало предельную нагрузку  $F_u = 1,53$  кН. Из сравнения предельных значений поперечных сил  $V_u^{теор} = 875$  Н (21) и  $V_u^{эксн} = 1,53 \cdot 10^3 / 2 = 765$  Н видно, что расхождение составило 12,6%.

Испытания БГС с наклонными РЖ (рисунок 13,б) показали, что наличие таких ребер повышает критическую нагрузку примерно в 1,7 раза по сравнению с балкой, имеющей только поперечные РЖ. Характерно, что форма потери устойчивости в процессе испытаний очень близка к форме выпучивания, полученной в расчетах МКЭ (рисунок 12,г).

## Заключение

1. Выполненный анализ литературных источников свидетельствует, что в настоящее время вопросы аналитического определения критических нагрузок при потере местной устойчивости стальных БГС окончательно не решены, а существующее нормирование критических напряжений желательно дополнить зависимостями для критических нагрузок, более удобных для задач практического проектирования. Проведенный системный анализ требований отечественных и зарубежных стандартов к назначению размеров подкрепляющих РЖ стальных БГС показал, что между ними имеются определенные расхождения, нуждающиеся в дополнительных теоретических и экспериментальных исследованиях.

2. Для проведения анализа были разработаны на языке APDL программы расчета на местную устойчивость БГС с наклонными и вертикальными РЖ, а также отдельных отсеков, подкрепленных РЖ.

3. Для выполнения экспериментальных исследований по оценке местной устойчивости и несущей способности маломасштабных моделей БГС была разработана и изготовлена конструкция портативного стенда.

4. Получены аналитические зависимости для определения критических нагрузок стальных БГС ( $q_{cr}$ ,  $F_{cr}$ ) без подкреплений при двух формах местной потери устойчивости от деформации сдвига и изгиба при действии равномерно распределенной нагрузки и сосредоточенной силы, показывающие хорошую корреляцию с расчетами МКЭ.

5. Предложены критерии определения форм потери устойчивости стенки стальных БГС  $k_\phi$  (от деформации сдвига или изгиба), которые позволяют заранее, на этапе проектирования, определить по какой из форм будет происходить местная потеря устойчивости неподкрепленной БГС.

6. Установлено, что при постоянной поперечной силе критическая нагрузка, соответствующая местной потере устойчивости стенки стальной БГС от сдвига, не зависит от длины шарнирно опертой балки.

7. Показано, что существующие рекомендации СП по подкреплению стенок стальных БГС ребрами жесткости нуждаются в корректировке: предлагаемая по СП методика определения ширины поперечного РЖ  $b_r$  не учитывает толщины стенки балки  $t_w$  и дает существенно завышенные размеры ребер.

8. Предложена зависимость для назначения оптимальных размеров подкрепляющих РЖ  $b_s$  и  $t_s$ , основанная на соотношении изгибной жесткости ребра и цилиндрической жесткости стенки балки.

9. Показано, что повышать жесткость РЖ выше оптимального значения нецелесообразно, т.к. ребро уже играет роль абсолютно жесткого подкрепления.

10. Отмечено, что установка наряду с поперечными наклонных РЖ во всех отсеках может в 1,7 раза повысить критическую нагрузку БГС. Установка наклонных ребер только в нескольких отсеках не столь значительно повышает устойчивость БГС.

11. Проведенные экспериментальные исследования устойчивости БГС, подкрепленных поперечными и наклонными РЖ, на моделях из жести при действии сосредоточенной силы, как и расчеты МКЭ, подтвердили приемлемость предложенных в работе зависимостей.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** В работе была исследована устойчивость балок в пределах упругих деформаций, т. е. в геометрически линейной постановке. С целью дальнейшего совершенствования расчетов и проектирования БГС представляет интерес исследование МКЭ устойчивости в геометрически нелинейной постановке.

Целесообразно также провести сравнительный анализ прочности и устойчивости БГС и гофрированных балок.

Практический интерес представляет также исследование устойчивости и несущей способности БГС при разном конструктивном оформлении, в частности, при наличии вырезов в концевых отсеках стенки.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

*Научные статьи, опубликованные в журналах, цитируемых в Web of Science и Scopus:*

1. Pritykin A. Critical rigidity of stiffener for increasing shear stability of rectangular plate / A. Pritykin, **I. Kirillov** // Mechanics. – 2015. – Vol. 21. – № 3. – P. 174-179.

2. Pritykin A.I. Rational Dimensions of Transverse Stiffening Ribs in Girders with a Slender Web / A.I. Pritykin, **I.E. Kirillov** // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 931. – P. 100-106.

3. Pritykin A.I. Local Stability of Beams with a Flexible Wall with the Concentrated Force Action / A.I. Pritykin, **I.E. Kirillov** // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 529-534.

*Научные статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендованный ВАК РФ:*

4. Притыкин А.И. Сопоставительный анализ требований СНиП и Еврокода 3 к местной устойчивости балок с гибкой стенкой / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов** // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 2(253). – С. 70-76.

5. Притыкин А.И. Влияние расположения и параметров ребра жесткости на устойчивость квадратной пластины при сдвиге / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов** // Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 77-87.

*Научные статьи, опубликованные в других журналах и материалах конференций:*

6. Pritykin A. Comparison of Russian SN&R and Eurocode 3 requirements to local stability of plate girders / A. Pritykin, **I. Kirillov** // Mechanika 2014: Proceedings of the 19th International Conference 24,25 April 2014. – Kaunas University of Technology, Lithuania: Technologija, 2014. – P. 213-218.

7. Притыкин А.И. Особенности расчета МКЭ прогибов и напряженного состояния двутавровых балок с применением элементов типа SHELL / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов** // Труды XII международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2014». – Калининград: ФГБОУ ВПО

«Калининградский государственный технический университет», 2014. – Т. 1. – С. 310-313.

8. **Кириллов И.Е.** Влияние ориентации ребра жесткости на устойчивость балки с гибкой стенкой / **И.Е. Кириллов**, А.И. Притыкин // Материалы VI Международного Балтийского морского форума 3-6 сентября 2018 года: «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве», IV Международная научная конференция. – Калининград: Обособленное структурное подразделение «БГАРФ» ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2018. – Т. 6. – С. 122-128.

*Объекты интеллектуальной собственности:*

9. Программа IB-THIN создания расчетной модели двутавровой балки с гибкой стенкой : свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2014612067 Российская Федерация / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов**. – № 2013661860 ; заявл. 19.12.2013 ; зарегистр. 17.02.2014 ; опубл. 20.03.2014.

10. Программа SHEAR-STIFF создания расчетной модели прямоугольной пластины, подкрепленной наклонным ребром жесткости : свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2015613152 Российская Федерация / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов**. – № 2014662334 ; заявл. 01.12.2014 ; зарегистр. 05.03.2015 ; опубл. 20.04.2015.

11. Стенд для испытаний на местную устойчивость и несущую способность моделей балок : пат. на пол. мод. 178359 Российская Федерация, МПК G01N 3/10, G01N 3/60. / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов**. – №2017141873 ; заяв. 30.11.2017 ; опубл. 30.03.2018, Бюл. № 10.

12. Стенд для испытаний на устойчивость жестко защемленных моделей балок при чистом изгибе : пат. на пол. мод. 183648 Российская Федерация, МПК G01N 3/20, G01N 3/60. / А.И. Притыкин, **И.Е. Кириллов**. – №2018121456 ; заяв. 06.09.2018 ; опубл. 28.09.2018, Бюл. № 28.

13. Стенд для испытаний на несущую способность моделей балок с гибкой стенкой при сосредоточенной нагрузке : пат. на пол. мод. 187240 Российская Федерация, МПК G01N 3/60 / **И.Е. Кириллов**, А.И. Притыкин. – №2018121455 ; заяв. 06.09.2018 ; опубл. 26.02.2019, Бюл. № 6.

Тираж 60 экз.  
Отпечатан в Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
236022, г. Калининград, Советский пр-кт, 1.